

# 竖管地下灌溉粉质壤土入渗湿润体的试验研究

何靖, 白丹, 郭霖, 王新端

(西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048)

**摘 要:**竖管灌水器是一种在低压(0.6~2.0 m)状况下对作物进行根部地下灌溉的新型灌水技术的核心部件。为了研究该灌水器在不同影响因素不同组合情况下湿润体特征参数值的变化,为竖管灌水器的进一步研究提供借鉴。试验采用正交试验设计安排了 9 组试验对压力水头、土壤初始含水率、竖管灌水器的竖管直径和土壤容重(每个因素取 3 个水平)4 个因素进行了室内试验研究。入渗试验 7 h 之后获得的结果表明:湿润体的湿润半径大小排序为  $Y_{\text{负}} \geq X \geq Y_{\text{正}}$ ,湿润体的含水率分布在水平方向呈现为圆形扩散,而竖直方向呈现为椭圆形扩散,表明重力对水分入渗有一定的影响。竖管地下灌溉湿润体平均含水率变化范围为 7.5%~33.3%,能够更好地满足不同作物的需水要求。

**关键词:**竖管灌水器;湿润体;地下灌溉;含水率;正交试验

中图分类号:S275.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0069-04

## Study on Wetted Volume of Silt Loam Under Sub-irrigation with Vertical Tube Emitter

HE Jing, BAI Dan, GUO Lin, WANG Xinduan

(Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Vertical tube emitter as a new sub-irrigation emitter which works under a low pressure head (0.6~2.0 m) for the root system growth zone, studying its infiltration characteristic is a necessary. The orthogonal experimental design was adopted to arrange the influence factors including pressure head, initial soil moisture content, diameter of vertical tube and soil bulk density to Table L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) of orthogonal experimental design (all the factors have 3 levels) and to study the characteristic parameters of wetted soil volume under sub-irrigation with vertical tube emitter, all the test followed the same study time (7 h). After the test, the radius of wetted soil volume had been measured by getting it out of the soil box and it was a whole because of the matrix potential. The radius of soil wetted volume was measured by manual inspection, the soil wetted volume was divided into 2 sections along axis Y. Then, the interval was marked as 2 cm for a test point to collect little wetted soil, oven drying method was used to measure the soil moisture content. The results pointed out that the order of radius was  $Y_{\text{negative axis}} \geq X_{\text{axis}} \geq Y_{\text{positive axis}}$ , and moisture content had an irregular distribution as like in horizontal plane as a circle, but in vertical plane as a ellipse, as well as that the variation of the average moisture content in soil wetted volume of vertical tube sub-irrigation greater than micro-moist irrigation can have a good satisfaction for water demand of different crops. This conclusion may have important directive significance for the further study on infiltration performance of a vertical tube emitter in subsurface irrigation and the application of a vertical tube emitter.

**Keywords:** vertical tube emitter; wetted soil volume; sub-irrigation; soil moisture content; orthogonal experimental design

竖管灌水器是竖管地下灌溉技术的核心部件,在灌水系统工作时,竖管灌水器埋于地下,下端敞口处与土壤接触形成一个水土接触面<sup>[1]</sup>,水分经此接触面进入土壤,作用到作物的根系活动土层,为作物提供

生长所需的水分;该灌水器技术的灌水压力为 0.6~2 m,有效的减少了地下灌溉的能源消耗;竖管灌水器的竖管有一定的长度且其直径较大(4,8,12 mm),在灌水结束时可以允许少量的土壤淤积,能够很好防

收稿日期:2015-04-15

修回日期:2016-04-29

资助项目:国家自然科学基金(41571222;51279156)

第一作者:何靖(1992—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:694081783@qq.com

通信作者:白丹(1960—),男,重庆人,博士,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:baidan@xaut.edu.cn

止灌水器的堵塞现象的发生。竖管灌水器入渗研究来源于国家自然科学基金资助项目《竖管地下灌溉毛管水力特性及土壤水分布对土壤空间变异的动态响应》。地下灌溉湿润体的特征值的变化规律和定量化解法,是特定的灌水技术进行灌溉系统设计和对作物需水量的供给进行管理的基础<sup>[2]</sup>。近年来,国内外大量的学者对滴灌<sup>[3-8]</sup>、膜孔灌<sup>[9-11]</sup>、无压灌溉<sup>[12-13]</sup>、负压灌溉<sup>[14-15]</sup>、微润灌溉<sup>[16-17]</sup>条件下,土壤湿润体的特征进行了研究。赵颖娜等<sup>[18]</sup>研究了不同流量和不同历时入渗情况下,土壤湿润体的特征变化,研究结果表明入渗时间与湿润体的扩散距离为显著的幂函数关系,湿润体的体积和含水率的分布受灌水器流量控制。王超等<sup>[19]</sup>研究了地下滴灌条件下,不同滴头流量和灌水量对湿润体特性的影响,流量和灌水量都选取了 3 个水平进行了研究,结果表明湿润峰的运移与流量的时间之间为正相关关系。王平等<sup>[20]</sup>研究了不同流量和湿润比条件下湿润体特性的变化,采用 2 种流量和 3 种湿润比进行了研究,研究结果表明湿润体的体积变化与时间成线性变化关系,大流量条件下的湿润体的湿润比大,灌水均匀度高。现有的对单点源入渗的湿润体特性研究大多集中在流量、灌水历时、灌水量等因素方面,竖管灌水器地下灌溉作为一种新型的地下灌溉技术,本试验在压力水头、竖管灌水器的竖管直径、土壤初始含水率和土壤容重变化的情况下,初步研究该灌水器的湿润体特性。

## 1 试验方案与装置

### 1.1 试验方案

参照地下滴灌的入渗试验,本试验选定压力水头、竖管灌水器的竖管直径、土壤初始含水率和土壤容重 4 个因素为初步试验因素,每个因素选取 3 个水平进行室内试验。试验中,水土接触面埋深均为 20 cm。在本次试验中,每组入渗试验的入渗时间均为 7 h,试验安排见表 1。

### 1.2 试验土壤

本次试验采用的试验用土取自西安周边,用 MS2000 型激光分析粒度仪测定其颗粒级配,为粉质壤土。该土壤颗粒粒径小于 0.001 的含量为 3.817%,小于 0.005 的含量为 19.857%,小于 0.01 的含量为 34.065%,小于 0.1 的含量占到总量的 99.868%,小于 0.2 的含量为 99.997%。

### 1.3 试验装置

试验装置主要由马氏瓶(7×6×60 cm 长×宽×高)、试验土箱(四周为 10 mm 钢化玻璃,底部为 5 mm 钢板,尺寸:长 41 cm×宽 31 cm×高 55 cm)、铁架及核

心部件竖管灌水器(竖管直径分别为 4,8,12 mm)。

表 1 试验方案

试验 方案	压力 水头/m	竖管灌 水器竖管 直径/mm	土壤初始 含水率/%	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )
1	0.6	4	7	1.32
2	0.6	8	10	1.37
3	0.6	12	13	1.42
4	1.3	12	7	1.37
5	1.3	4	10	1.42
6	1.3	8	13	1.32
7	2	8	7	1.42
8	2	12	10	1.32
9	2	4	13	1.37

### 1.4 数据记录

土壤湿润体含水率分布测量:以水土接触面为参考平面,建立直角坐标系,竖直方向为 Y 轴,水平方向为 X 轴。试验结束后,将湿润体取出,以 Y 轴为对称轴从上向下将湿润体剖开,用直尺测量竖直和水平方向的湿润半径,其中 Y 轴测量水土接触面上下两边的湿润半径;由于水平方向湿润面为圆,以直径为轴两边对称,故只测一边湿润半径。在坐标轴上每隔 2 cm 取一个点(不足 2 cm 的按照所余距离取最后一点),取一定量的土壤用烘干法测量其土壤含水率。

## 2 结果与分析

### 2.1 影响因素显著性分析

2.1.1 直观分析 数据的直观分析,应用 Excel 2010 软件进行,获得的直观分析结果见表 2。

从表 2 中可以看出,压力水头的极差值最大,表明压力水头对竖管灌水器累计入渗量的影响程度最大;土壤容重的极差值最小,表明其对累计入渗量的影响程度最小;竖管直径和土壤初始含水率的极差值介于上述二者之间,表明对累计入渗量有一定的影响程度,且竖管直径的影响程度大于土壤初始含水率的影响程度。

2.1.2 方差分析 根据正交试验的方差分析,将极差值最小的因素作为误差项进行处理,获得方差分析结果(置信度为 95%)见表 3。

由表 3 中的结果可以看出:在置信度为 95%的情况下,只有压力水头呈显著性,其余两个因素呈非显著性,竖管灌水器的竖管直径的影响作用大于土壤初始含水率(F 比值大小不同),表明压力水头对竖管灌水器入渗影响起到决定性作用。

表 2 直观分析值

试验方案	压力水头/m	竖管灌水器竖管直径/mm	土壤初始含水率/%	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	入渗量/ml
1	1(0.6)	1(4)	1(7)	1(1.32)	478.8
2	1	2(8)	2(10)	2(1.37)	409.6
3	1	3(12)	3(13)	3(1.42)	441.0
4	2(1.3)	1	2	3	420.0
5	2	2	3	1	663.6
6	2	3	1	2	901.4
7	3(2.0)	1	3	2	793.8
8	3	2	1	3	1159.2
9	3	3	2	1	1099.2
I <sub>j</sub>	443.1	564.2	846.5	747.2	
II <sub>j</sub>	661.7	744.1	642.9	701.6	
III <sub>j</sub>	1017.4	813.9	632.8	673.4	
极差 R	574.3	249.7	213.7	73.8	

注:表 2 中, I<sub>j</sub>, II<sub>j</sub>, III<sub>j</sub> 表示表示各因素在每一水平下的平均累计入渗量。

表 3 方差分析值

因素	偏差平方和	自由度	F 比	显著性
压力水头	504085.22	2	60.5	*
竖管直径	99572.18	2	11.9	
初始含水率	87181.94	2	10.4	
土壤容重	8321.04	2	1	
误差	8321.04	2		

注:  $F_{0.05}(2,2)=19$ 。

2.2 湿润体含水率分析

根据表 1 安排的试验方案,进行室内试验,获得因素不同组合情况下湿润体 X 轴和 Y 轴的湿润半径,见表 4。

表 4 湿润体半径

试验方案	X 轴半径	Y 轴半径	
		cm	
		正向	负向
1	7	7	7
2	9	8	10
3	10	9	11
4	11	10	12
5	11	10	10
6	10.5	9	10
7	9	8	10
8	13	12	14
9	11	10	12

试验结束后,测得不同试验组中湿润体不同位置的含水率。表 5 中给出了部分试验方案的湿润体含水率。

由表 4 和表 5 中的数据可以看出:距水土接触面的湿润半径:X 轴湿润半径大于 Y<sub>正</sub>湿润半径、小于 Y<sub>负</sub>

湿润半径;土壤湿润体含水率的变化:随 Y 轴和 X 轴半径土水结合面湿润半径越远,湿润体土壤含水率越小;水分受重力影响,Y<sub>负</sub>方向的入渗驱动力略大于正向,使湿润体 Y<sub>负</sub>方向略凸出,湿润半径增大。

表 5 湿润体不同点含水率

试验方案	X 轴		Y <sub>正</sub> 轴		Y <sub>负</sub> 轴	
	距离/cm	含水率/%	距离/cm	含水率/%	距离/cm	含水率/%
1	0	0.29	0	0.29	0	0.29
	2	0.26	2	0.24	2	0.24
	4	0.24	4	0.16	4	0.20
	6	0.20	6	0.15	6	0.17
	7	0.18	7	0.13	7	0.13
	0	0.32	0	0.32	0	0.32
	2	0.30	2	0.25	2	0.26
	4	0.27	4	0.24	4	0.25
	6	0.24	6	0.22	6	0.24
	8	0.23	8	0.20	8	0.23
	10	0.21	10	0.18	10	0.20
5	11	0.19				
	0	0.25	0	0.25	0	0.25
	2	0.23	2	0.22	2	0.23
	4	0.22	4	0.21	4	0.22
	6	0.21	6	0.17	6	0.21
	8	0.20	8	0.16	8	0.20
	10	0.19	10	0.12	10	0.18
	11	0.15			12	0.17

注:表中距离为距水土接触面的距离,水土接触面处探头计入 X 轴。

由表 5 可以看出,水土接触面处的含水率最大,并在水土接触面周围形成一个土壤含水率趋于饱和和<sup>[21-22]</sup>的饱和带,在该过程中灌溉水受基质势和压力

势的共同作用,基质势的作用逐渐减小,压力势的作用逐渐增大;当土壤达到饱和含水率时,基质势为零,此时灌溉水入渗主要受压力势的作用。随着入渗时间的不断增大,土壤含水率饱和圈逐渐增大,水分向周围土壤的扩散速度逐渐减小,最终趋于一个稳定值。此时,湿润体与试验用土壤产生的接触面处,土壤含水率产生跳跃式减小,形成一层干湿交接面。

湿润体含水率的减小在水平方向即  $X$  轴上,呈对称式减小,即水平向上的含水率变化呈现圆环式减小;竖直方向即  $Y$  轴上,其正向含水率减小略小于负向减小,即相同距离时,正向点上的含水率略大于负向点上的含水率,而负向的湿润半径略大于正向的湿润半径。

微润灌溉现已广泛的应用于实际生产中<sup>[23]</sup>,湿润体的平均含水率变化范围为  $5\% \sim 25.1\%$ <sup>[15]</sup>;竖管地下灌溉湿润体的平均含水率分别为  $33.3\%$ ,  $13.4\%$ ,  $10.5\%$ ,  $7.5\%$ ,  $12.0\%$ ,  $18.6\%$ ,  $26.0\%$ ,  $21.0\%$  和  $20.0\%$ , 可变范围较之微润灌溉略大,为  $7.5\% \sim 33.3\%$ , 表明竖管地下灌溉入渗累计入渗量的变化范围大,是可行的。在实际生产中可以根据作物的不同需水要求进行调控,尽可能的满足作物对水分的不同需求。

### 3 结论

(1) 压力水头对竖管地下灌溉入渗有显著性影响,竖管管径次之,其次为土壤初始含水率、土壤容重;

(2) 竖管地下灌溉粉质壤土湿润体含水率的分布在水平方向呈现为圆环式湿润锋,竖直方向上:正向减小略慢于负向,呈现出类椭圆形湿润锋,湿润半径大小排序:  $Y_{负} \geq X \geq Y_{正}$ ;

(3) 竖管地下灌溉湿润体的平均含水率变化范围大于微润灌溉,为  $7.5\% \sim 33.3\%$ , 表明竖管地下灌溉入渗累计入渗量的变化范围大,能够实时调控满足作物对水分的不同需求。

#### 参考文献:

- [1] Ben-Gal A, Lazarovitch N, Shani U. Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities [J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(4): 1407-1413.
- [2] 赵伟霞, 蔡焕杰, 陈新明, 等. 基于土壤湿润体特征值的无压灌溉灌水定额模型研究[J]. 节水灌溉, 2008(12): 5-8.
- [3] 张振华, 蔡焕杰, 郭永昌, 等. 滴灌土壤湿润体影响因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 17-20.
- [4] 李明思, 康绍忠, 孙海燕. 点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 32-35.

- [5] Lubana P P S, Narda N K. SW—Soil and water: modelling soil water dynamics under trickle emitters: A review[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(3): 217-232.
- [6] 赵伟霞, 张振华, 蔡焕杰, 等. 间接地下滴灌土壤湿润体特征参数[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 87-92.
- [7] Hinnell A C, Lazarovitch N, Furman A, et al. Neuro-Drip: estimation of subsurface wetting patterns for drip irrigation using neural networks[J]. Irrigation Science, 2010, 28(6): 535-544.
- [8] Yao W W, Ma X Y, Li J, et al. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation[J]. Irrigation Science, 2011, 29(4): 331-339.
- [9] 费良军, 李发文, 吴军虎. 膜孔灌单向交汇入渗湿润体特性影响因素研究[J]. 水利学报, 2003, 5(5): 62-68.
- [10] 费良军, 董玉云, 朱兴华. 膜孔单点源肥液入渗湿润体特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 78-81.
- [11] 范严伟, 马孝义, 王波雷, 等. 膜孔灌土壤湿润体水分分布与入渗特性数值模拟[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 35-41.
- [12] 赵伟霞, 蔡焕杰, 陈新明, 等. 无压灌溉土壤湿润体含水率分布规律与模拟模型研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 7-12.
- [13] 赵伟霞, 蔡焕杰, 陈新明, 等. 无压灌溉土壤湿润体特征值变化规律与经验解[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 30-33.
- [14] 肖娟, 江培福, 郭秀峰, 等. 负水头条件下水质对湿润体运移及水盐分布的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 101-107.
- [15] 冀荣华, 王婷婷, 祁力钧, 等. 基于 HYDRUS-2 D 的负压灌溉土壤水分入渗数值模拟[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 113-119.
- [16] 牛文全, 张俊, 张琳琳, 等. 埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 128-134.
- [17] 薛万来, 牛文全, 罗春艳, 等. 微润灌溉土壤湿润体运移模型研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 49-54.
- [18] 赵颖娜, 汪有科, 马理辉, 等. 不同流量对滴灌土壤湿润体特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 30-35.
- [19] 王超, 李援农. 地下滴灌条件下湿润体特性的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(3): 38-40.
- [20] 王平, 胡笑涛, 乔林然, 等. 流量与湿润比对湿润体特性影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(11): 11-15.
- [21] 仵峰, 吴普特, 范永申, 等. 地下灌溉条件下土壤水能态研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 31-35.
- [22] 仵峰, 李王成, 李金山, 等. 地下滴灌灌水器水力性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 85-88.
- [23] 何玉琴, 成自勇, 张芮, 等. 不同微润灌溉处理对玉米生长和产量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(4): 566-569.